

文章编号:1001-8166(2007)11-1169-09

我国沙尘暴特征及其与干旱关系的研究进展^{*}

李耀辉¹, 张书余²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点(开放)实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省气象局, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 阐述了我国沙尘暴空间分布、时间演变的最新事实特征, 综述了我国沙尘暴与干旱关系研究方面有代表性的新成果, 在此基础上探讨了沙尘暴灾害的形成及其与干旱相互作用的物理机制。

关键词: 沙尘暴; 干旱; 相互关系; 物理机制; 研究进展

中图分类号: P445⁺.4 **文献标识码:** A

1 引言

沙尘暴主要发生于荒漠化严重的我国北方干旱、半干旱地区, 是一种危害较强的灾害性天气。沙尘暴会引起一系列生态与环境问题, 如荒漠化、土壤肥力下降、空气污染、对人类生命和财产安全的危害等; 同时, 沙尘天气产生的悬浮于对流层的沙尘微粒是大气气溶胶的重要来源之一, 并随着大气运动输送、扩散至很远的地区, 引起辐射平衡过程的变化, 进而引起区域乃至全球的气候变化。所以, 进一步揭示沙尘暴的最新事实特征, 深入研究沙尘暴与干旱气候及其引起的荒漠化等相关生态问题之间的关系, 具有科学性和现实意义; 而且沙尘暴与干旱(气候)之间密切关联。

干旱一般有两种内涵, 即干旱气候和干旱灾害。干旱气候是一种长期稳定的气候现象, 代表一定地区在多年形成的水热平衡过程中, 相对于热量收支条件而言缺乏足够的降水量。干旱灾害是由于大气环流异常而引起一些年份或时段降水缺乏而导致的植物枯死、水资源严重不足等灾害现象。干旱灾害可以发生在任何气候带上, 干旱、半干旱地区是干旱灾害发生最频繁的地区。

沙尘暴是强风将地表沙尘吹起使空气很混浊, 水平能见度小于1 km的天气现象。沙尘暴的形成

归结起来取决于地表状况和气象条件。地表状况主要指地表性质、土壤含水量、植被覆盖等, 气象条件就是气候异常、强冷空气活动、大气不稳定等。

干旱会造成土壤严重失水, 荒漠化加剧, 为沙尘暴发生提供更加充足的沙尘源; 而在干旱地区或者发生严重干旱的区域, 一旦有强冷空气活动, 出现地面大风, 就容易引发沙尘暴。反过来, 沙尘暴释放的沙尘气溶胶的气候效应, 以及风蚀造成地表覆盖变化而引起地—气间能量交换发生变化这两种作用, 又都将对干旱的发生发展产生影响。

本文说明了沙尘暴的分布、时间演变的最新事实特征, 并在分析相关研究成果的基础上, 阐述沙尘暴灾害的形成与干旱的关系及其可能的物理过程。

1 沙尘暴分布和演变的新特征

1.1 沙尘暴分布

沙尘天气分为沙尘暴、扬沙和浮尘。从我国沙尘天气的区域特征来讲, 沙尘暴年平均发生日数大于10天的区域主要分布在南疆盆地、河西地区及青藏高原东北部^[1]。我国沙尘暴的空间分布基本上与北方沙漠及沙漠化土地分布相一致。

近几年, 随着一些气象站的新建, 沙尘暴频次又有了新的观测事实。以往根据南疆盆地南缘几个气象站观测记录表明, 和田、民丰等地是沙尘暴最多发

收稿日期: 2007-09-20; 修回日期: 2007-10-28.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“西北沙尘暴关键区近地面起沙特征的观测与数值研究”(编号: 40645027)资助。

作者简介: 李耀辉(1967-), 男, 甘肃徽县人, 研究员, 主要从事干旱气象与环境研究工作. E-mail: li-yaohui@163.com

的地区之一,但随着塔中 1 井(83°40'E,38°40'N)、满参(84°21'E,40°06'N)等南疆盆地腹地 6 个油田气象站的建立和观测,表明塔中 1 井是我国沙尘暴最多的地区,近 10 年平均的年沙尘暴日数可达 65 天(图 1),仅比世界最高频数的伊朗扎布尔南站(Zabol,81 天)、次高频数的乌兹别克斯坦来别梯克站(Repetek,66 天)稍低^[2]。

钱正安等^[2]补充最新资料,得出了目前我国比

较完善的强和特强沙尘暴序列(图 2),我国强或特强沙尘暴总频数在 20 次以上的多发区仅有 5 大片:以民勤为中心(53 次)的河西走廊区;和田为中心(42 次)的南疆盆地区;以拐子湖为中心(25 次)的内蒙古阿拉善高原区;以伊克乌素镇为中心(27 次)的鄂尔多斯高原区;以朱日和为中心(22 次)的浑善达克沙地区。

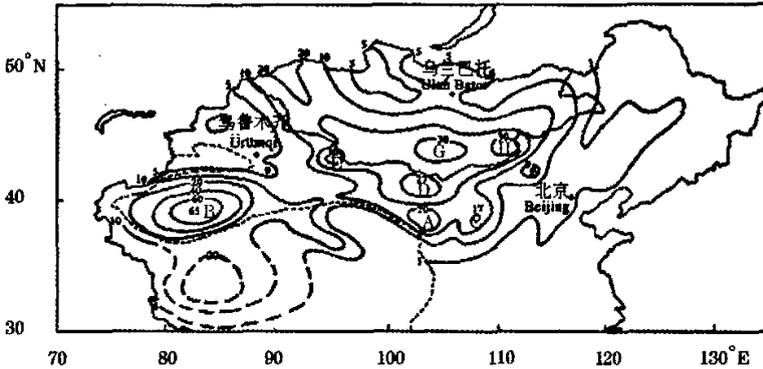


图 1 1964—2000 年间中蒙地区年平均沙尘暴日数分布^[2]

Fig. 1 Yearly mean day numbers of duststorms over China-Mongolia areas(1964-2000)

A-H 分别为中国的民勤、塔中 1 井、伊克乌素、拐子湖、朱日和、淖毛湖和蒙古国的达兰扎达嘎德及扎门乌德等沙尘暴多发区中心
A-H are the stations at Minqin, Oil well No. 1 in the aenler of the Tarim basin, Yikewusu Guaizihu, Zhurihe, Naomaohu in China and Dalanzadgad and Zumin Uud in Mongolia, respectively^[2]

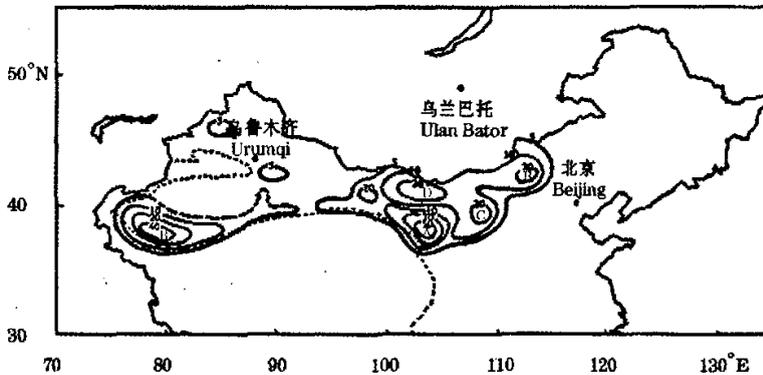


图 2 1952—2001 年间中国北方强和特强沙尘暴总频数(次)分布^[2]

Fig. 2 Strong and very strong duststorm total frequencies(time)over North China^[2]

A、B、C、D 及 E 站分别是民勤、和田、伊克乌素、拐子湖及朱日和等 5 大沙尘暴多发区中心
A、B、C、D and E are Minqin, Hotan, Yikewusu, Guaizihu and Zhurihe stations, respectively

1.2 沙尘暴的时间演变

我国沙尘暴自 20 世纪 50 年代以来总体上呈波动式减少趋势^[1-4],20 世纪 90 年代达到最少。就

北方整体而言,沙尘暴年发生日数的减少趋势非常明显,从 50 年代中期的年平均 10 天左右减少到目前的 3 天左右,下降 2 倍还多(图 3),其中春季下降

最明显,从平均每年 6 天左右降至不足 2 天^[4]。进入 21 世纪,虽然 2001 年、2006 年相对较多,但沙尘暴发生次数处在下降通道中。

我国沙尘暴在最近 50 年也发生了突变,沙尘暴

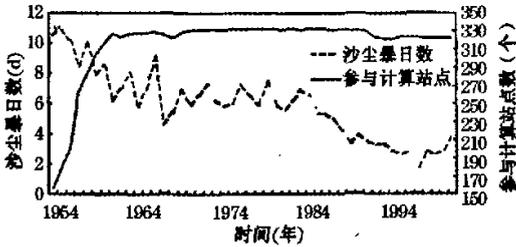


图 3 1954—2001 年中国北方沙尘暴年平均发生日数演变趋势^[4]

Fig. 3 Evolution trend of the annual average day numbers of duststorms over Northern China (1954-2001)^[4]

和扬沙分别在 1985 年和 1984 年发生了由多到少的突变^[5]。这种突变似乎和与我国特别是沙尘暴多发的西北地区气候在 1981 年前后也出现的一次明显变化有着某种联系。

尽管我国沙尘暴的发生近 50 多年呈减少趋势,但个别地区如浑善达克西部的沙尘暴为波动增加态势^[6]。

2 干旱及干旱气候变化对沙尘暴形成的作用

干旱对沙尘暴的影响是多个气候因子的综合作用的结果,最终归结为动力条件和地表状况。动力条件—地面大风的驱动是沙尘暴发生的根本原因,而地表状况变化是降水和温度这两个干旱气候因子的直接结果。

2.1 大风

大风为沙尘暴发生发展提供动力条件。大风对沙尘暴的影响表现在沙尘暴随时间的波动减少与大风减少密切相关;但同时,在同样具有丰富沙尘源的情况下,大风多发的地区并不一定是沙尘暴多发的地区,两者在空间上并不完全重合^[7]。

(1) 大风减少决定了沙尘暴出现频次减少。以西北地区为例,从时间演变来看,西北地区沙尘暴总体上与其大风演变趋势是一致的。图 4 是新疆南部的和田(塔克拉玛干沙漠)、甘肃民勤和内蒙古西部的拐子湖(巴丹吉林沙漠)近 40 多年大风和沙尘暴年平均日数变化曲线,发现两者的变化趋势一致,总

体上都是逐年减少的演变特点,特别是民勤,其大风和沙尘暴的年际、年代际变化几乎同步。可见,在下垫面状况不变或变化不大的情况下,沙尘暴发生与大风密切相关,近年来沙尘暴次数减少可能主要是由于沙尘暴驱动因子——大风天气的减少所致。

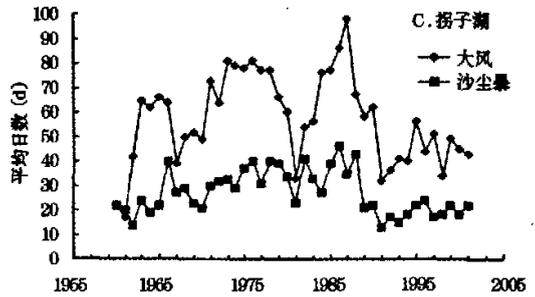
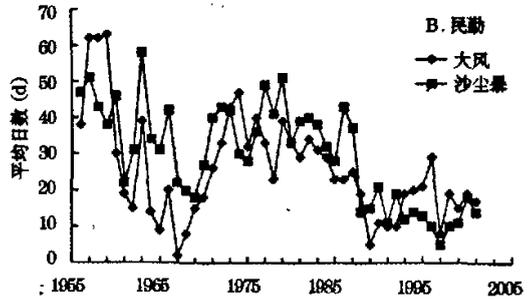
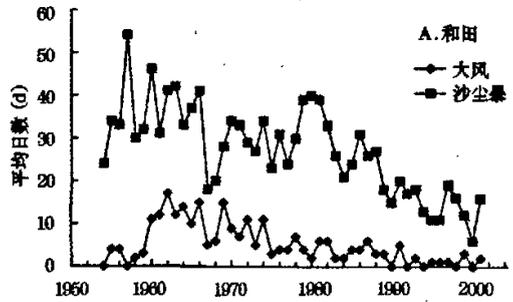


图 4 西北地区代表站近 40 多年大风和沙尘暴年平均日数变化曲线^[7]

Fig. 4 Yearly changing curves of annual average gale days and sandstorm days in past 40 years observed at representative stations in Northwest China^[7]

根据图 4,和田的沙尘暴日数远多于大风日数,而拐子湖的大风日数却比沙尘暴日数明显偏多。虽然同为沙漠地区,也都是我国沙尘暴主要多发区,但是由于两地沙源的沙粒性质(粒径、疏松度、含水量等)可能存在差异,因此在同样的大风条件下,塔克拉玛干沙漠及其附近地区较巴丹吉林沙漠更容易起沙;同样强度的沙尘暴,巴丹吉林沙漠及其附近地区

则需要更强的风力来驱动^[7]。

观测表明,沙尘暴起沙风速为 5 m/s。张莉等^[4]分析了在更大范围的我国北方沙尘暴与平均风速和大于 5 m/s 风速日数之间的统计关系,其相关系数分别为 0.73 和 0.69;沙尘暴和扬沙天气与大风的相关更达到了 0.946。说明作为沙尘暴的直接动力条件,大风直接影响着沙尘暴的产生。

沙尘暴和扬沙是和风动力条件密切相关、具有起沙特征的沙尘天气,统计表明我国北方的沙尘暴和扬沙天气的变化趋势表现为随着大风的减少而减少(图 5)^[8]。

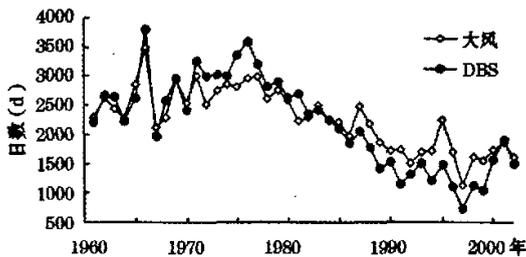


图 5 中国北方沙尘暴和扬沙(DBS)日数、大风日数逐年变化^[8]

Fig. 5 Annual distributions of spring DBS days and gale days recorded by 175 stations in northern China^[8]

(2) 大风频发区并不与沙尘暴频发区完全重合。新疆的南疆盆地是我国沙尘暴多发的区域,但是大风天气却较少,一般在 10 d/a 左右;而天山以北是大风多发到频发区,大风日数明显多于南疆盆地,但是南疆盆年均沙尘暴日数远多于新疆天山以北地区。又如甘肃河西走廊地区,沙尘暴发生最多在走廊中部的民勤,也是我国的沙尘暴最频发区之一,但是它的年平均大风为 23 天,春季 9.5 天,均少于沙尘暴日数,而大风最频发区在走廊西部的安西(图 6)。这主要由于沙尘暴分布与丰富的沙源有密切关系,南疆盆地位于塔克拉玛干沙漠。民勤恰好位于雅布赖山和龙首山形成的山口下方,其前后被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠包围,丰富的沙源和山口下风方向的有利地形条件,使民勤成为我国的沙尘暴最频繁地之一^[7]。

在干旱、半干旱地区,沙源丰富,大风明显影响沙尘暴的发生发展。但同时,下垫面特征和沙尘源的性质(沙尘粒子大小、土壤疏松度、含水量等等)、分布对沙尘天气形成也具有重要作用,大风甚至达不到大风标准的吹风天气在沙尘源地及其附近地区

也极易产生沙尘暴。所以,改善生态环境,提高植被覆盖率是减少西北地区沙尘暴天气发生的根本途径之一。

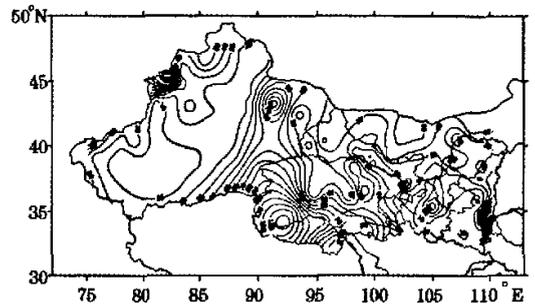


图 6 西北地区年平均沙尘暴日数空间分布^[7]

Fig. 6 Spatial distribution of annual average gale days in Northwest China^[7]

2.2 降水和温度

我国沙尘暴多发区平均年降水量仅为 198.47 mm, 低于干旱区与半干旱区之间的临界值(200 mm)^[11], 可见沙尘暴是干旱、半干旱气候区的产物。

我国北方大部分地区沙尘暴发生频数与其降水量和相对湿度之间存在负相关,即沙尘暴发生日数随本地降水和相对湿度的增加而减少^[4]。另外,前期降水与同期降水一样,通过增加土壤湿度和地表植被覆盖来抑制沙尘暴发生,统计也显示春季和前冬沙尘源区降水多寡对沙尘暴的发生有着重要的影响。

沙尘暴也容易发生在干旱时段。如内蒙古 1965—1975 年间干旱少雨,1976—1996 年间相对比较湿润,所以 20 世纪 60 年代发生特强沙尘暴 16 次,而且多数出现在 1965 年以后的少雨段,仅 1966 年就达 8 次^[9]。河西和南疆这两个沙尘暴多发区 20 世纪 80 后期至 90 年代沙尘暴偏少也与其同时期内降水偏多有关。

所以,降水抑制沙尘暴发生,使沙尘暴减少。沙尘暴主要发生在降水稀少的极干旱、干旱和半干旱区或者降水异常偏少的干旱时段内。

温度变化通过引起大气环流的变化来影响沙尘暴的发生发展,统计显示温度变化与沙尘暴趋势呈反相关关系^[4,8,10](图 7)。

进一步分析温度影响沙尘暴的原因表明,包括中国北方在内的北半球中高纬度地区最近 50 年明显变暖,且欧亚大陆高纬度比中低纬度增温明显。这种变暖差异的后果之一就是改变中纬度大气的温

压结构和对流层中上层平均西风环流特征,减弱温带气旋锋生作用;另一个明显的后果是冬春季寒潮势力减弱,这和冬季地面西伯利亚高压平均强度减弱及春季温带气旋数量下降是对应的。北方特别是沙尘源区平均风速和大风日数的长期下降就是上述温压场和环流变化的直接反映,进而导致北方沙尘暴生成所必需的动力条件的弱化^[10-12]。

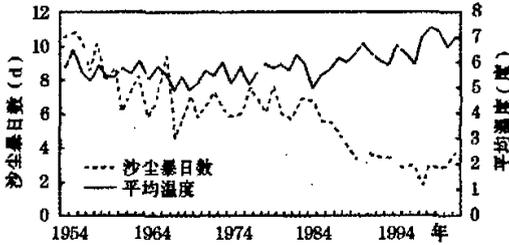


图 7 中国北方平均沙尘暴日数与沙源区平均温度的时间变化曲线^[4]

Fig. 7 evolution curves of the annual average day numbers of sandstorm and the temperature in sand source area over Northern China^[4]

2.3 干旱气候变化对沙尘暴的影响

百年以上尺度干旱气候变化对沙尘暴的影响,主要利用冰芯、河床沉积、树木年轮以及史料记载等记录重建温度、降水长时间序列的代用资料,来分析历史气候演变以及不同气候时期风沙活动特点。这对于追溯沙尘暴来源,预估气候变化情景下沙尘暴的发展趋势具有重要意义。

在较早揭示气候变化与沙尘天气之间关系的研究中,张德二^[13]的工作有代表性。她根据我国史料记载、历史气候资料 and 现代气象记录,给出了我国近 3000 年降尘地点分布图和近 1700 年降尘频数曲线,指出近 500 年典型的气候暖期和冷期的沙尘(雨土)出现频数差异明显(图 8),冷期(1621—1700, 1811—1900)平均频数为 3.7 年/10 年,暖期(1511—1620, 1721—1780)平均频数为 2.1 年/10 年,而且降尘的沉积厚度在冷期明显大于暖期。把降尘曲线分别与我国北方 105°E 以东的湿润指数序列和 105°E 以西 500 年旱涝等级资料对比分析,同样发现降尘频繁期对应干旱气候背景。所以,大量研究证明沙尘暴频发的时期一般对应降水偏少、温度偏低的气候干冷期。

干旱气候变化对沙尘暴的影响主要表现在为沙尘暴发生提供有利与否的气候背景条件,其物理机

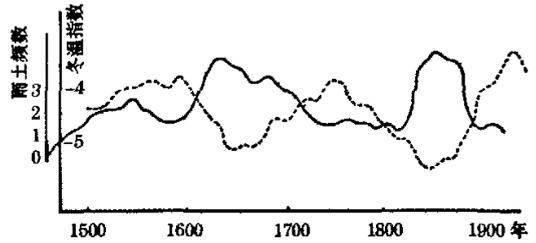


图 8 近 500 年雨土年频数曲线(实线)和冬温指数平均曲线(虚线)^[12]

Fig. 8 Average curves of the dust rain frequency (real line) and the winter temperature index (dashed line) in the past 500 years^[12]

制比较复杂,但从根本上讲,气候变化主要是通过温度、降水变化的综合效应,引起地表状况(沙尘源)和起沙动力条件(风)的变化来影响沙尘暴的发生与发展趋势。温度或降水等任何单一气候因子对沙尘暴的影响必然伴随另一个气候因子的辅助作用。

绝大多数沙尘暴发生于干旱、半干旱地区,但是降水和温度对沙尘暴的影响在干旱地区和半干旱地区所起的作用是有差异的^[14]。在干旱地区,其基本特征是降水稀少,地表植被覆盖率极低,沙漠或裸露荒地分布广泛,沙尘源丰富而且长期存在,一旦大于起沙风速的大风出现,很容易造成沙尘暴发生发展。而降温过程往往伴随着强冷空气爆发,会产生地面大风。所以降温与沙尘暴的发生密切关联。在半干旱地区,降水量要多于干旱地区,地表状况好于干旱地区,但降水变率大,其生态环境的变化严重依赖于自然降水的多寡,在降水异常偏少的干旱时期,植被明显退化,覆盖率迅速减小,荒漠化加剧,沙尘源地扩大,为沙尘暴发生发展提供了有利条件;如果降水偏多,其生态环境就会明显改善,同时降水直接增加了土壤湿度,使土壤颗粒固结程度提高,从而减少沙尘暴发生的可能性。所以,气候变化的冷干时期,沙尘暴发生频发,相反在暖湿气候期,冷空气偏弱,降水偏多,沙尘暴就不易发生。

2.4 干旱对沙尘暴影响的物理机制

干旱对沙尘暴影响的根本在于改变了沙尘暴产生的地表状况(沙尘源)和动力条件(大风)。

沙尘暴发生是大气动力过程向风沙物理过程转换的结果,强风驱使沙尘粒子启动(起沙)是沙尘暴形成的首要条件。一次沙尘暴形成的简要过程可以描述为:地表微小的沙尘颗粒被地面强风吹起,在近

地面形成沙尘浓度梯度(风沙流),通过湍流或垂直运动输送到空中,使空气混浊,能见度急剧下降;同时在大气环流作用下将沙尘输送到周边以及很远的地方。可见,起沙是沙尘暴发生发展的首要和关键环节,能否起沙决定了沙尘暴能否形成。

起沙涉及到风沙动力学、空气动力学、边界层以及土壤类型和状态等多种复杂物理过程和特性,归结起来,沙尘粒子的受力和地表特性是决定起沙的 2 个主要因素。一般来说,粒子受到的力有 2 种,即把粒子抬离地面的力(它是临界摩擦速度的函数,包括空气升力和拖曳力等,记为 f_1)和阻碍粒子运动的力(包括重力和粒子间力如静电力、毛细管力等,记为 f_2)。是否起沙,是这些力共同作用的结果,如果 f_1 小于 f_2 ,就不会产生起沙;反之沙尘粒子启动,在大气垂直运动的作用下被输送到高空而形成沙尘暴。临界摩擦速度 u_c^* 使沙粒脱离静止状态而开始运动的临界风速在这种过程中起了重要作用。在考虑土壤水分的情况下,临界摩擦速度为^[15]

$$u_c^* = u_{c0}^* \begin{cases} 1 & w \leq w' \\ [1 + 1.21(w - w')^{0.68}]^{0.5} & w > w' \end{cases}$$

其中, w 与 w' 是实际土壤的体积含水量(土壤湿度)与临界体积含水量,且:

$$w' = 0.0014(\% \text{ clay})^2 + 0.17(\% \text{ clay})$$

可见临界摩擦速度与粒子的粒径、地表性质和土壤含水量等因素有关。

当有降水时,土壤含水量增加,水分会在土壤粒子表面吸附成膜,并在土壤粒子间形成水楔,一方面使土壤粒子所受重力增大,另一方面增加粒子间的内聚力(毛细管力)。在这两种力增大的共同作用下, f_2 增大,在土壤水分未达到最大持水量之前,使潮湿土壤沙尘粒子启动的临界摩擦速度提高而难以起沙,即使大风也不会产生沙尘暴。反之,在干旱地区或者降水稀少时段,土壤干,沙尘粒子重量和粒子间内聚力减小,干燥土壤的临界摩擦速度减小,一遇大风,沙尘粒子便很容易启动而形成沙尘暴。所以,干旱对沙尘暴的影响从本质上是温度、降水等因子的共同作用,使地表状况发生变化而有利于起沙,最终导致沙尘暴容易发生发展的结果。

3 沙尘暴对干旱(气候)的影响

沙尘暴对干旱的影响主要表现在两方面:

- (1) 通过沙尘暴释放到大气中的沙尘气溶胶所具有的气候效应。
- (2) 沙尘暴必然伴随土壤风蚀,其累积效应就

是地表状况的改变,影响地—气间的能量交换,从而影响气候和气候变化。目前沙尘暴对(干旱)气候的影响研究方兴未艾,一些成果具有创新性和前沿性,但许多成果仍需要进一步证实。

3.1 沙尘气溶胶对干旱气候的影响

沙尘气溶胶(矿物气溶胶)是对流层大气气溶胶的主要构成成分,据估计,全球每年进入大气的沙尘气溶胶达 10~20 亿 t,几乎占了对流层中气溶胶总量的一半。沙尘气溶胶主要来源于干旱或半干旱地区的风蚀过程(沙尘天气)。

气溶胶有明显的气候效应,它主要通过 3 种途径影响气候及气候变化:一是通过吸收和散射太阳辐射及地面和云层长波辐射来影响地球辐射收支和能量平衡,这就是气溶胶的直接辐射效应;二是作为云滴中的云凝结核(CNC)改变云的光学特性和生命周期,这种变化同时影响地—气系统的短波和长波辐射,成为气溶胶的间接辐射效应;三是气溶胶可以改变大气化学过程,抵消人类排放温室气体导致气温变暖的效应。

截止目前的研究表明,气溶胶的气候效应存在很大的不确定性,其气候净效应如何?还需要进行大量的观测、试验和数值模拟研究。过去十多年的研究得出的大量重要证据表明,该气溶胶对地球的平衡冷却减少了温室气体变暖的作用。气候变暖引起干旱、暴雨等极端天气、气候事件的频繁发生,而气溶胶对大气的冷却作用会部分减缓由于气候变暖造成干旱灾害的频率。

沙尘气溶胶作为大气气溶胶的主要组成部分,同样通过这些机制影响干旱及干旱气候变化。已有的研究结果通常认为沙尘气溶胶的净辐射效应表现为在地面的冷却和在气溶胶层的加热,这种效应好比给地球撑了一把阳伞,因此被称为阳伞效应。但这种辐射强迫存在很大的不确定性^[16],如 2001 年 IPCC 公布的沙尘气溶胶产生的辐射强迫在 $-0.6 \sim -0.4 \text{ W/m}^2$ 之间,连这一强迫的正(使气候变暖)负(使气候变冷)号也没有确定^[17]。粉尘的分布具有明显的地区性,这种效应主要表现在局地。且粉尘在大气中滞留的时间一般为几天或几周,对全球气候的影响远较估计温室气体的效应更为困难。同时,估算约有 1.0~3.0 Gt/a 的沙尘粒子被注入大气,而且具有高度的时空可变性,这些因素给研究沙尘气溶胶产生的气候强迫带来了极大的困难。所有这些不确定因素都说明沙尘气溶胶在地面和大气顶对辐射平衡的影响依赖于气溶胶浓度、化学成分、谱

分布和垂直分布等气溶胶参数以及地面反照率、温度等一些因素。

除这些直接辐射效应以外,若干“间接”的以云为媒介的沙尘气溶胶效应都将引起冷却:沙尘气溶胶越多,云中较小水滴使气溶胶产生更大的反射。小水滴越小越不可能形成雨滴,于是,云存在的时间越长就越增加了地球的反照率,最后改变了云中使降雨发生变化的热力学过程,也改变了驱动所有天气和气候变化的大气热“机”动力学。

3.2 沙尘暴(土壤风蚀)导致的地表状况改变对干旱气候的影响

干旱、半干旱以及半湿润地区的干旱现象一方面与大地形作用造成的下沉运动有关,另一方面是由于风沙天气的土壤风蚀造成的荒漠化(沙漠化)过程中,通过地表反照率的加强引起的自反馈作用。地面反照率的变化能够产生显著的局地环流和降水的变化,进而对干旱气候产生影响。

沙尘暴是一种风沙过程,土壤风蚀是其必然结果,土壤风蚀造成地表裸露,沙漠化加剧。由于裸露土壤和沙漠比有植被土壤的地面反照率更强,因此沙漠可以比周围地区反射更多的太阳辐射,引起到达地表的太阳短波辐射能减少,导致地表蒸发量和空中云量相应地减少,从而形成一个辐射热汇。地面储热少,空气散热大,为了维持热量平衡,空气必然有下沉运动,这样又导致地面蒸发和上空云量及降水的减少。因此地表的植被面积减少,沙漠等地表干旱区增大,反过来又加强了反照率,形成正反馈。反照率加强所造成的潜热和感热向大气输送量减少,导致冷却。它将减小低层辐合及上升运动,或增大低空辐散和下沉运动。这些效果将进一步减少降水量,使得大气变干。这样动力学效应和热力学效应相互作用而形成了干旱气候^[18]。

沙尘暴必然引起地表覆盖状况的改变,而地表状况变化会通过上述过程对干旱气候造成影响。

4 结 语

沙尘暴与干旱的关系密切而复杂,涉及到很多领域,归结起来,地表(下垫面)状况(或曰土地覆盖)是两者相互作用的关键点。干旱对沙尘暴的作用最终通过改变地表状况来实现;反之,沙尘暴影响干旱气候的主要过程是通过影响下垫面而引起地一气间能量交换的变化,从而实现了对大气运动的影响。所以与下垫面相联系的、围绕干旱和沙尘暴及其相互关系的陆面过程研究就显得十分重要,但从现状

看,这方面的研究还不够充分和系统。如就下垫面及其变化对起沙过程影响程度的综合研究来看,其成果不多见,主要有两方面原因:一是单一下垫面对起沙因子影响的研究居多,如单纯戈壁表面或稀疏天然植被或耕作土壤表面等下垫面对风蚀起沙及其影响因子的作用研究等,而西北干旱、半干旱区典型地貌完整下垫面组合对起沙过程影响的观测和模拟研究尚需加强;二是陆面过程观测与数值模式特别是起沙数值模式的结合仍然滞后,导致下垫面特征的变化对起沙进而对天气、气候可能造成的影响程度的定性分析多,定量研究缺乏。

参考文献(References):

- [1] Wang Shigong, Wang Jinyan, Zhou Zijiang, et al. Regional characteristics of dust events in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 193-200. [王式功,王金艳,周自江,等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 193-200.]
- [2] Qian Zheng'an, Cai Ying, Liu Chuntao, et al. Some advances in dust storm research over China-Mongolia areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 83-92. [钱正安,蔡英,刘春涛,等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 83-92.]
- [3] Zhou Zijiang, Zhang Guocai. Typical severe dust storms in Northern China during 1954-2002[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(21): 2366-2370. [周自江,章国材. 中国北方典型的强沙尘暴事件(1954—2002年)[J]. 科学通报, 2003, 48(21): 2366-2370.]
- [4] Zhang Li, Ren Guoyu. Change in dust storm frequency and the climatic controls in Northern China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(6): 744-750. [张莉,任国玉. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候特征成因分析[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 744-750.]
- [5] Ding Ruiqiang, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. Analyses of sandstorm and sand-blowing weather trend and jump in China in recent 45 years[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(3): 306-310. [丁瑞强,王式功,尚可政,等. 近45a我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 306-310.]
- [6] Wang Geli, Lu Daren, Yiu Li. Analyses of Climatic characteristics in Hunshandake dust storm[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(4): 434-439. [王革丽,吕达仁,尤莉. 浑善达克沙地沙尘暴气候特征分析[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 434-439.]
- [7] Li Yaohui, Zhang Cunjie, Gao Xuejie. Temporal and spatial characteristics of gale weather over Northwest China[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(6): 715-723. [李耀辉,张存杰,高学杰. 西北地区大风日数的时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 715-723.]
- [8] Zhou Zijiang, Zhang Guocai, Ai Wanxiu. Time series of spring dust emission and its correlative climatic factors in Northern China

- [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(6):935-941. [周自江, 章国材, 艾婉秀, 等. 中国北方春季起沙活动时间序列及其与气候要素的关系[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6):935-941.]
- [9] Liu Jingtao, Zheng Mingqian. The climatic characteristics of special strong sanddust storm in Northern China [J]. *Meteorological Monthly*, 1998, 24(2): 39-44. [刘景涛, 郑明倩. 华北北部特强沙尘暴的气候特征[J]. 气象, 1998, 24(2):39-44.]
- [10] Qian Weihong, Quan Lingshen, Shi Shaoying. Variations of dust storm in China and its climatic control [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15:1 216-1 229.
- [11] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Long-term variability of the siberian high and the possible connection to global warming [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(2): 125-130 [龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究[J]. 地理学报, 1999, 54(2):125-130.]
- [12] Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiuyan, et al. Causes of sand-stormy weather in Northern China and control measures [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 55(5):513-522. [叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2001, 55(5):513-522.]
- [13] Zhang Deer. Preliminary analyses of synoptic climatology of dust descent in China in historic period [J]. *Science in China (Series B)*, 1984, 2:278-288. [张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J]. 中国科学: B 辑, 1984, (3):278-288.]
- [14] Zhang Ziyin, Yang Bao. Dust storm events and their relation to climate changes in Northern China during the past 2000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 906-914. [张自银, 杨保. 中国北方过去 2000 年沙尘事件与气候变化[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6):906-914.]
- [15] Fe'can F, Marticorena B, Bergametti G. Parameterization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas [J]. *Annales Geophysicae*, 1999, 17:149-157.
- [16] Shi Guangyu, Zhao Sixiong. Several scientific issues of studies on the dust storms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4):591-603. [石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. 大气科学, 2003, 27(4):591-603.]
- [17] Song Lianchun, Deng Zhenyong, Dong Anxiang. ARID [M]. Beijing: Meteorological Press, 2003: 64-65. [宋连春, 邓振镛, 董安祥. 干旱[M]. 北京:气象出版社, 2003:64-65.]

Review of the Research on the Relationship between Sand-Dust Storm and Arid in China

LI Yao-hui¹, ZHANG Shu-yu²

(1. Institute of Arid Meteorology, Lanzhou, CMA; Key (Open) Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of (CMA) Gansu Province, Lanzhou 730020, China;
2. Gansu Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In this paper, new research advances and representative productions about the temporal and spatial characteristics of sand-dust storm and the relationship between sand-dust storm and arid in China are briefly reviewed and summarized. The mechanism of the formation of sand-dust storm and the interaction between sand-dust and arid is also discussed.

Key words: Sand-Dust storm; Arid; Relationship; Physical mechanism; New advances.